Тестирование релятивистских и космологических эффектов в Солнечной системе

Общая теория относительности

Изменение гравитационной постоянной G

Темная материя

DE ephemerides — Development Ephemeris, Jet Propulsion Laboratory, эфемериды DE, разработанные в Лаборатории реактивного движения, (Пасадена, США)

EPM — Ephemerides of Planets and the Moon (ИПА РАН, Россия)

INPOP ephemerides — Intégrateur Numérique Planétaire de l'Observatoire de Paris (Париж, Франция)

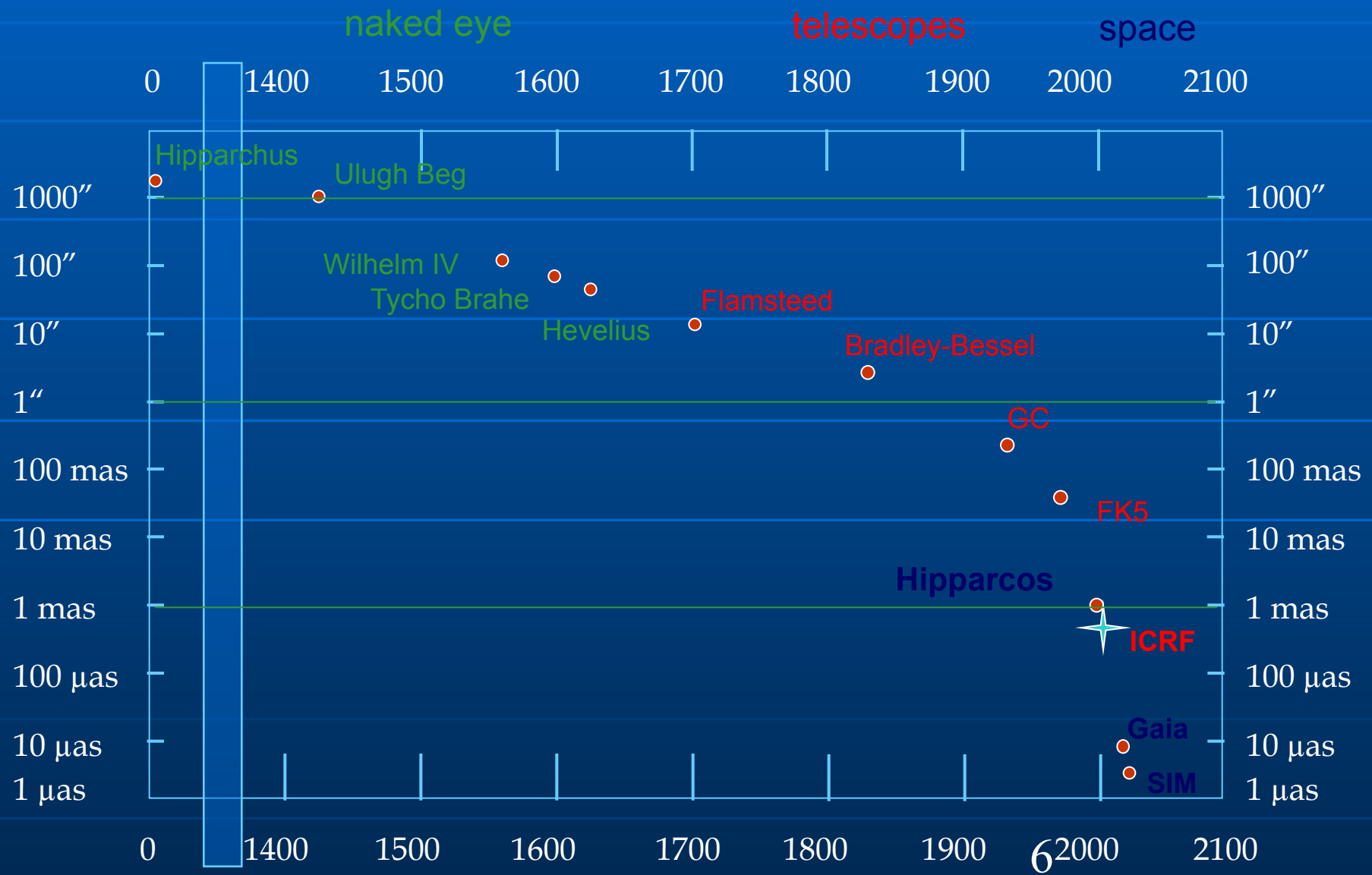
Планетные эфемериды EPM2014

Численные эфемериды EPM2014 (Ephemerides of Planets and the Moon) были построены с использованием более 800 тысяч наблюдений (1913-2014 гг.) различных типов.
Уравнения движения тел брались в параметризованной постньютоновской метрике n-тел для Общей теории относительности в TDB шкале времени.
Интегрирование в барицентрической системе координат в шкале времени TDB на эпоху J2000.0 выполнялось методом Эверхарта на интервале 400 лет (1800-2200 гг.) лунно-планетным интегратором программного пакета ЭРА-7 (Krasinsky and Vasilyev, 1997).
Эфемериды EPM вместе с соответствующими разностями TT–TDB, а также 7 дополнительными объектами: Ceres, Pallas, Vesta, Eris, Haumea, Makemake, Sedna доступны через FTP: ftp://quasar.ipa.nw.ru/incoming/EPM/.

Динамическая модель EPM2014 учитывает (помимо взаимных возмущений больших планет и Луны):

– возмущения от 301 наиболее массивных астероидов,
– возмущения от остальных малых планет главного пояса астероидов, моделируемым притяжением двумерным однородным кольцом,
– возмущение от 30 наибольших транснептуновых объектов.
– возмущения от остальных транснептуновых планет, моделируемых однородным кольцом (на среднем расстоянии 43 АЕ),
– релятивистские возмущения,
– возмущения от сжатия Солнца ($2 \cdot 10^{-7}$),
– возмущения, вызываемые несферичностью фигур Земли и Луны.

Точность астрометрических наблюдений



Наблюдения, использованные для EPM2014 (> 800 тысяч наблюдений)

Планета	Радиотехнические		Оптические	
	Интервал наблюдений	Число норм. точек	Интервал наблюдений	Число наблюдений
Меркурий	1964-2009	757	——	——
Венера	1961-2013	3779	——	——
Марс	1965-2014	47755	——	——
Юпитер + 4сп.	1973-1997	51	1914-2013	14866
Сатурн +7 сп.	1979-2014	188	1913-2013	16455
Уран + 4 сп.	1986	3	1914-2013	12550
Нептун + 1 сп.	1989	3	1913-2013	12404
Плутон	——	——	1914-2013	16674
Всего	*1961-2014*	*52556*	*1913-2013*	*72049*

Редукции радарных наблюдений

- релятивистские редукции — запаздывание сигнала в гравитационных полях Солнца, Юпитера, Сатурна (эффект Шапиро) и редукция наблюдений от координатного времени эфемерид к собственному времени наблюдателя;
- запаздывание в тропосфере Земли;
- запаздывание в солнечной короне, параметры ее модели определяются из наблюдений для каждого соединения (необходимы наблюдения на нескольких частотах !);
- поправки за топографию поверхностей планет (Меркурий, Венера, Марс).

Редукции оптических наблюдений

- опорные каталоги => FK4 => FK5 => ICRF;
- поправки за дополнительный эффект фазы (основные поправки за фазу внесены самими наблюдателями);
- релятивистские поправки за отклонение света.

В основном варианте улучшения планетной части EPM2014 эфемерид определялось около 270 параметров:

- **элементы орбит планет и спутников внешних планет;**
- **величина астрономической единицы;**
- **углы ориентации эфемерид относительно ICRF;**
- **параметры вращения Марса и трех ПА на Марсе;**
- **массы около 30 астероидов, средние плотности таксономических классов астероидов (C, S, M),**
- **масса главного астероидного пояса, масса кольца ТНО,**
- **отношение масс Земли и Луны;**
- **квадрупольный момент Солнца и параметры солнечной короны для разных соединений планет с Солнцем;**
- **коэффициенты топографии Меркурия и поправки к уровенным поверхностям Венеры и Марса;**
- **коэффициенты для дополнительного учета эффекта фазы внешних планет.**
- **пост–модельные параметры (β, γ, движение π, $\dot{G}M_{\bullet}/GM_{\bullet}$, $\dot{G}/G$, изменение a_i).**

Ориентация планетных эфемерид EPM2014 относительно международной системы отсчета ICRF

Выполнена по VLBI наблюдениям космических аппаратов около планет на фоне квазаров, координаты которых даны в системе ICRF:

1 mas = 0.001″

Интер-вал	Число наблю-дений	ε_x *mas*	ε_y *mas*	ε_z *mas*
1989-2010	213	-0.000 ±0.042	-0.025 ±0.048	+0.004 ±0.028
1989 - 2014	281	0.002 ±0.038	0.001 ±0.041	0.000 ±0.025

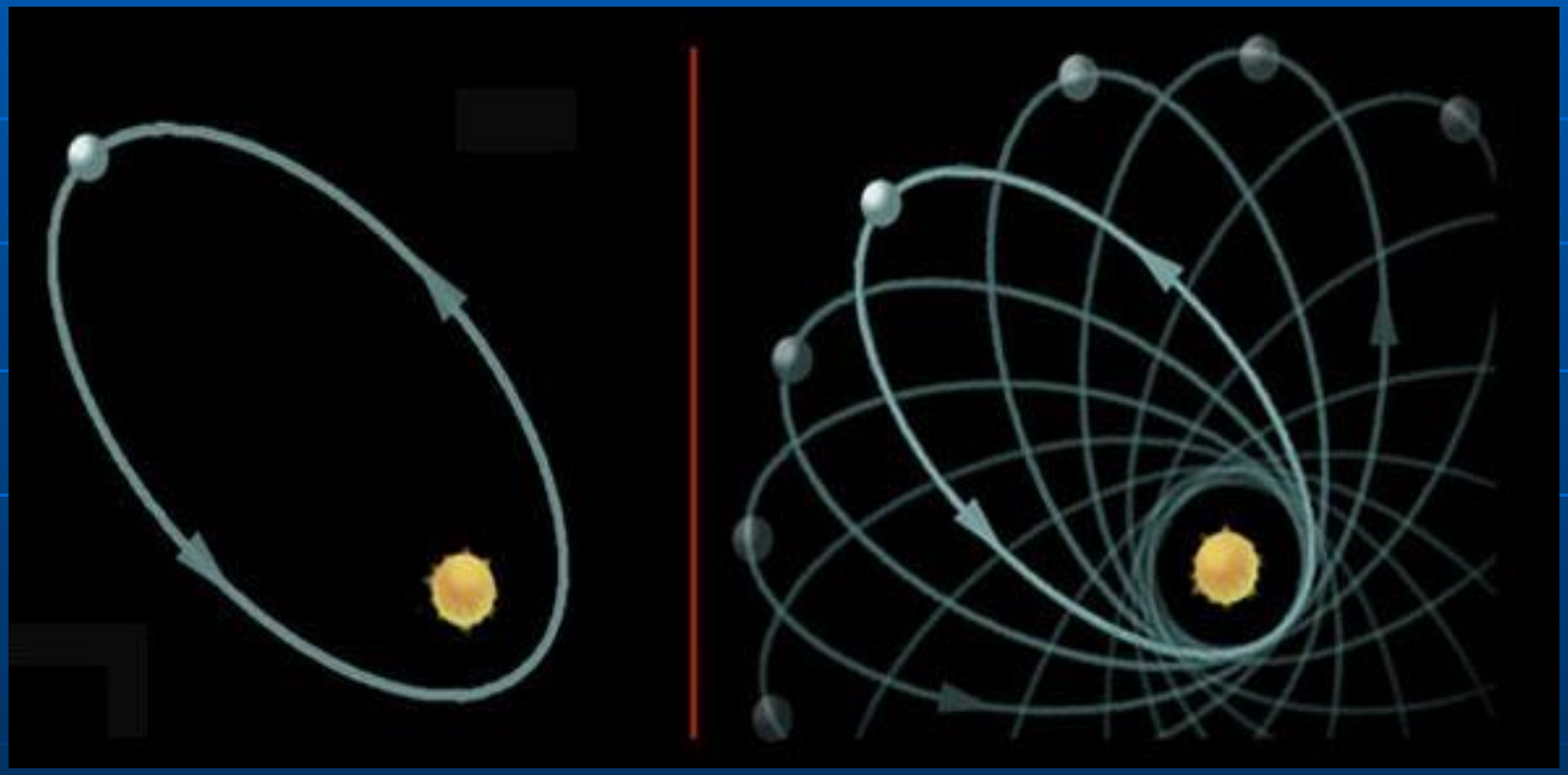
Тестирование эффектов ОТО

Дополнительное смещение перигелия Меркурия, обнаружено Леверье, 1859 г.

Cause of advance	Rate (″/century)
General precession (epoch 1900)	5 025.6
Venus	277.8
Earth	90.0
Mars	2.5
Jupiter	153.6
Saturn	7.3
Others	0.2
Sum	5 557.0
Observed Advance	5 599.7
Discrepancy	42.7

Ньютоновское притяжение

Общая теория относительности



Parametrized post-Newtonian (PPN) formalism
(Параметризованный пост-ньютоновский PPN-формализм)

- K. Nordtvedt, C. Will (1970-е)

- Двумя самыми важными параметрами являются
  γ и β ($\gamma = \beta = 1$ в ОТО)

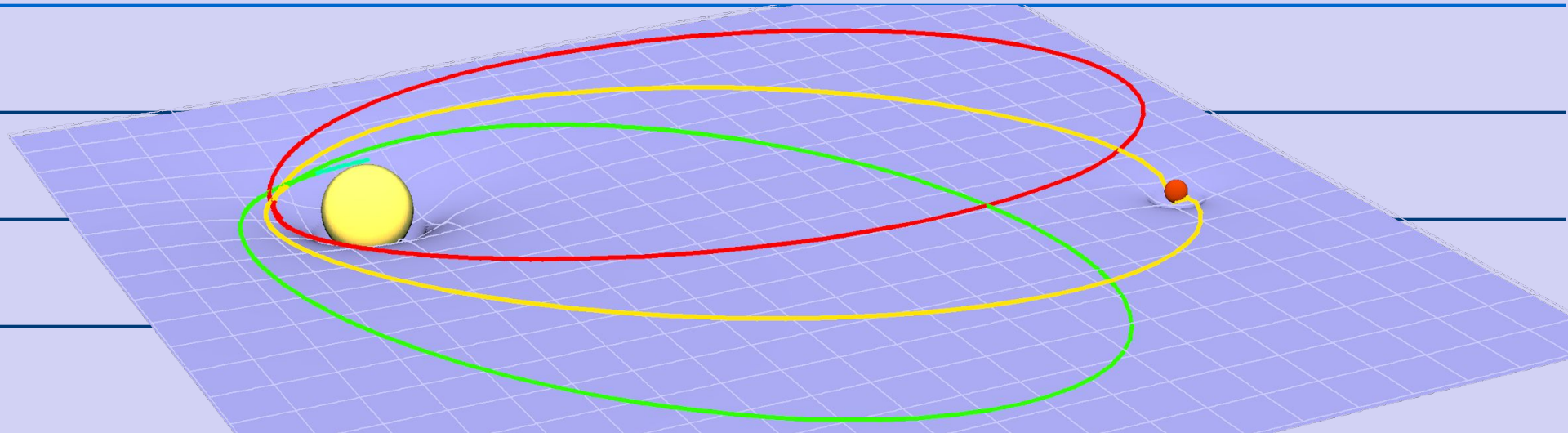
- Предсказания различных теорий гравитации могут быть выражены, используя эти параметры

Первый тест ОТО: Смещение перигелия

В Общей теории относительности Эйнштейна было объяснено смещение перигелия Меркурия.

$$\Delta\omega = 2\pi \frac{(2\gamma + 2 - \beta) GM_{\odot}}{c^2 a (1 - e^2)}, \quad \text{rad per revolution}$$

Точность смещения перигелия (2008): $\sim 10^{-3}$



Второй тест Общей теории относительности: отклонение света

Возможные результаты:

- **Нет отклонения = 0**
- **Ньютон = 0.87″**
- **Эйнштейн = 1.75″**

Прав оказался Эйнштейн

$$\Delta\varphi = \frac{2(1+\gamma)GM_{\odot}}{c^2 d}$$

Третий тест ОТО: эффект Шапиро

Свету требуется больше времени, чтобы пройти расстояние от излучателя до приемника, чем просто расстояние между ними, деленное на скорость света

$$t = \frac{1}{c}\left|\mathbf{x}_{\text{emitter}} - \mathbf{x}_{\text{receiver}}\right| + \frac{(1+\gamma)GM_{\odot}}{c^3} F\left(\mathbf{x}_{\odot}, \mathbf{x}_{\text{emitter}}, \mathbf{x}_{\text{receiver}}\right)$$

Открыт Ирвином Шапиро в 1964 году как теоретическое предсказание Общей теории относительности, первые измерения, сделанные в конце 1960-х годов подтвердили значение Шапиро с точностью 10%.

PPN параметры β и γ (General Relativity: β = γ = 1)

Полученные нами результаты:

$\beta - 1 = -0.00002 \pm 0.00003$, $\gamma - 1 = +0.00004 \pm 0.00006$

=> соответствие планетных движений и распространения света ОТО

Французские коллеги (Fienga et al., 2015) получили аналогичные результаты на основе своих численных эфемерид INPOP13:

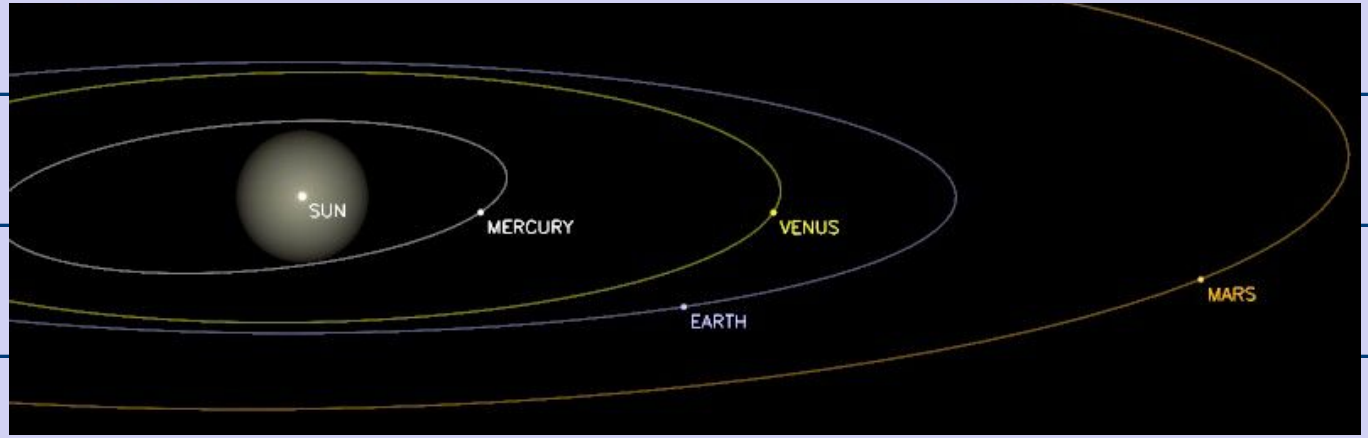
$\beta - 1 = 0.00000 \pm 0.00007$, $\gamma - 1 = -0.00002 \pm 0.00005$,

(готовится статья в Celestial Mechanics Dyn. Astr., 2015)

Изменение G во времени

Если G зависит от времени, то движение планет будет происходить с изменениями полуосей и появится дрейф периодов орбитального движения планет

$$\dot{G}/G, \quad \mathrm{yr}^{-1}$$



Из наблюдений движения планет можно получить, как меняется

гелиоцентрическая гравитационная постоянная Солнца $GM_{\odot}$

Некоторые параметры

Гелиоцентрическая гравитационная постоянная

$GM_\odot$ **=(132712440041±10) км^{3}сек$^{-2}$** (MAC, 2009)

Средняя полная светимость Солнца $L_\bullet$ = 3.846 • 10^{33} эрг/с ,
(Willson R. C., et al., 1986, Science, 234, 1114)

Масса Солнца M = 1.9891 • 10^{33} г
(Brun A.S., et al., 1998 Astrophys. J., 506, 913-925),

Гравитационная постоянная
G=(6.67428 ±0.00067) • 10^{-11} м^3/кг сек^2 (CODATA 2006)

Астрономическая единица AE=(149597870700 м (MAC, 2012)

Уменьшение массы Солнца

Убыль массы Солнца вследствие излучения:

$\dot{M}_\odot/M_\odot$ **= - 6.789 • 10^{-14} в год.**

Убыль массы Солнца вследствие солнечного ветра:

$\dot{M}_\odot/M_\odot$ **= - 2 • 10^{-14} в год.**

(Hundhausen, 1997; Meyer-Vernet N., 2007)

Также указывают для солнечного ветра

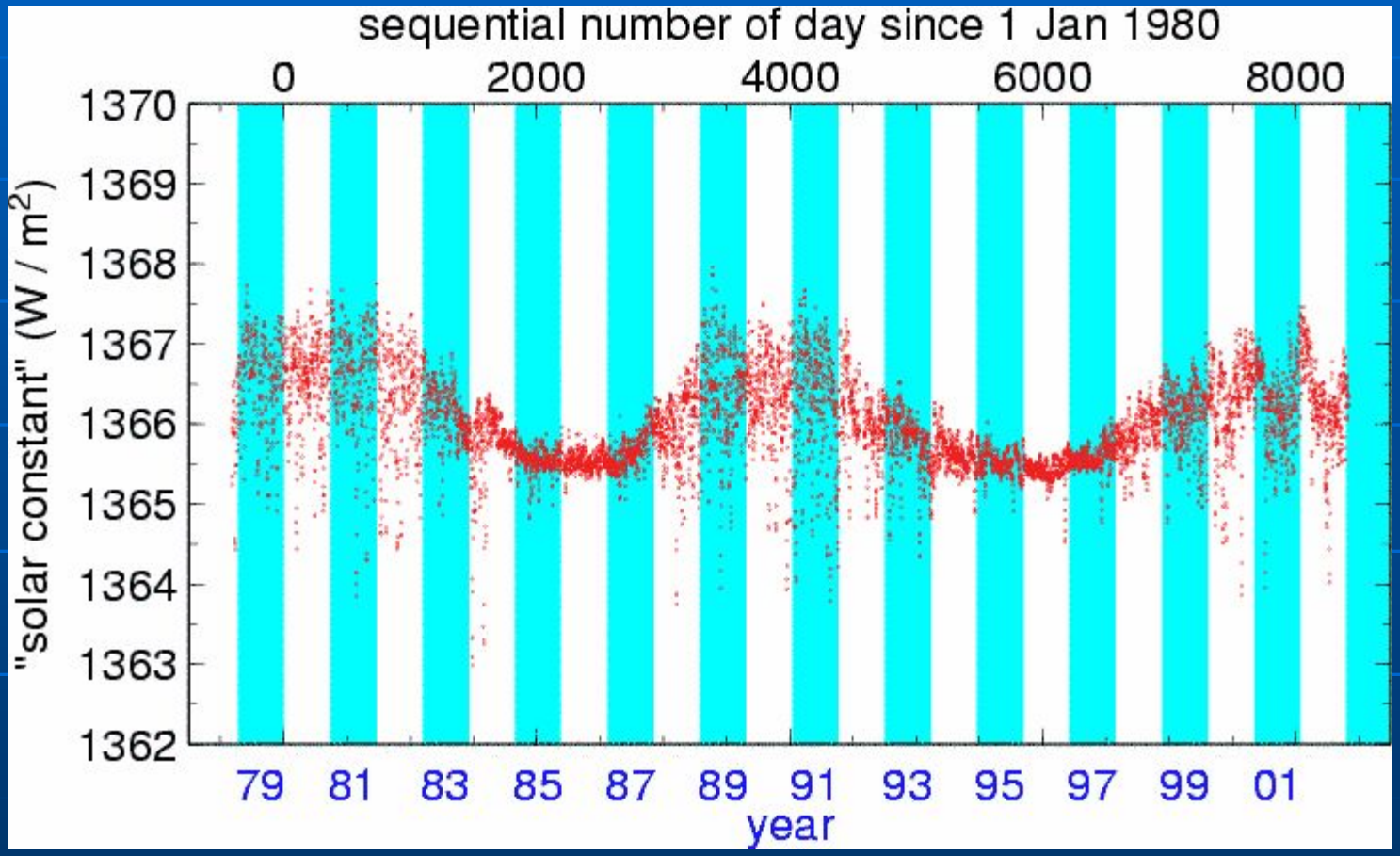
$\dot{M}_\odot/M_\odot$ **= - (2-3) • 10^{-14} в год.**

(Carroll, Ostlie, 1996; Livingston, 2000)

Совместный эффект уменьшения за счет излучения и солнечного ветра:

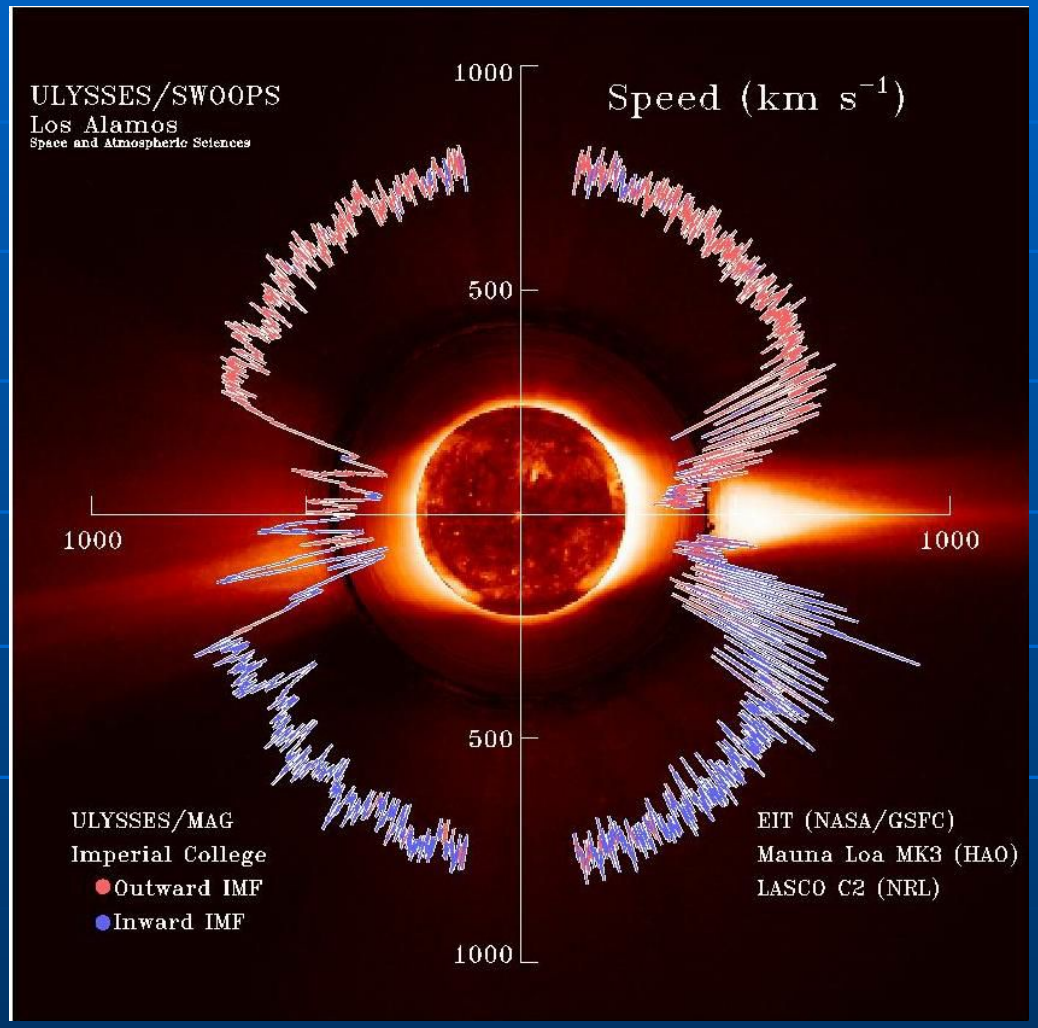
$$-9.8 \cdot 10^{-14} < \dot{M}_\odot/M_\odot < -8.8 \cdot 10^{-14}.$$

Полный поток излучения от Солнца меняется менее 0.2%



Убыль массы Солнца вследствие излучения : $M_{\bullet} / M = 6.789 \cdot 10^{-14}$ в год.

Имеется поток солнечного ветра



Убыль массы Солнца вследствие солнечного ветра:

$$\dot{M}_{\bullet} / M = (2 \div 3) \cdot 10^{-14} \text{ в год.}$$

Возрастание массы Солнца

Существует обратный процесс – увеличение массы Солнца:

– за счет падения метеорного и астероидного вещества на Солнце;

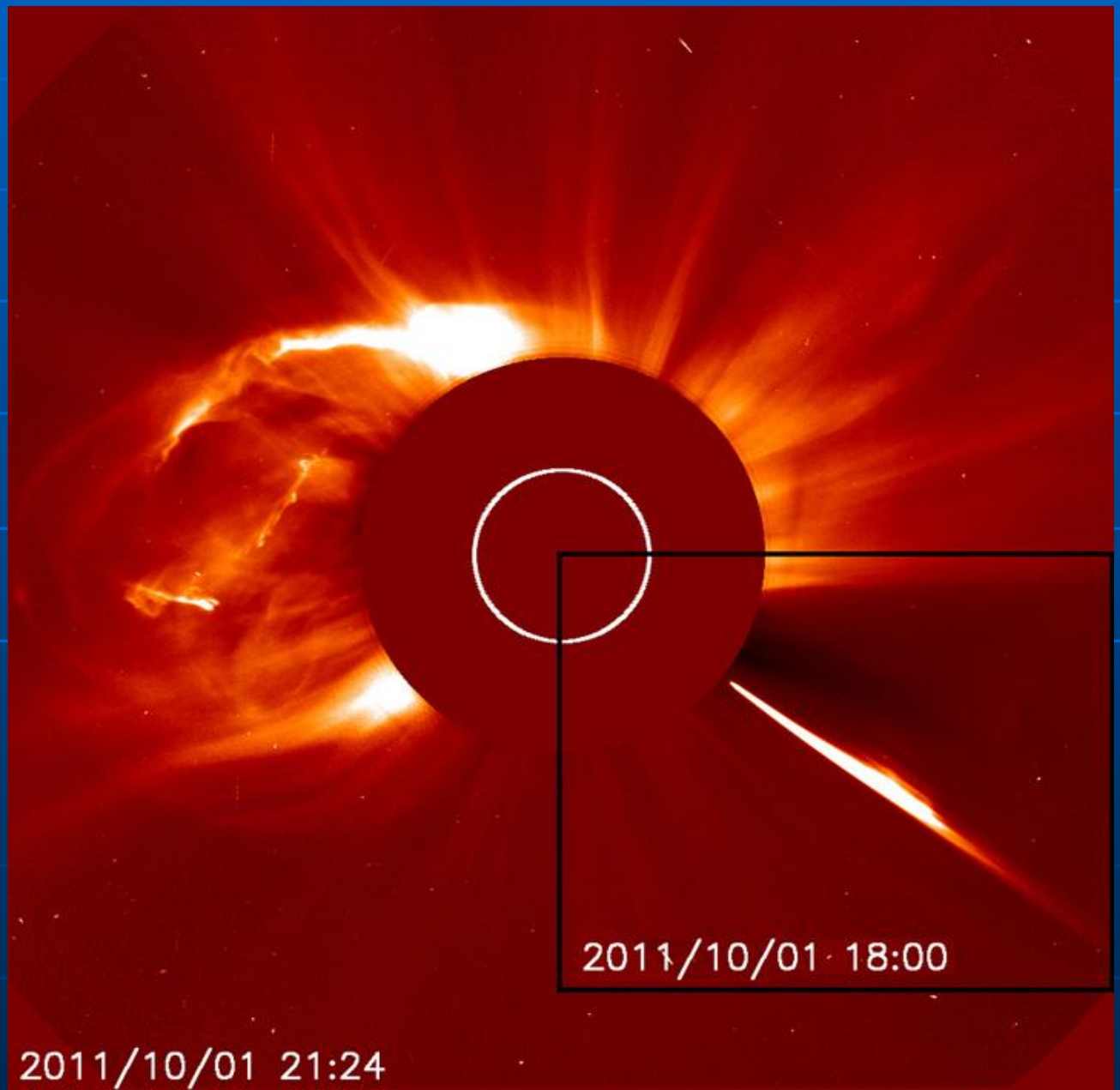
– за счет вещества, приходящего из дальних областей Солнечной системы, главным образом, в форме комет (из занептуновых областей - пояс Койпера, облако Оорта).

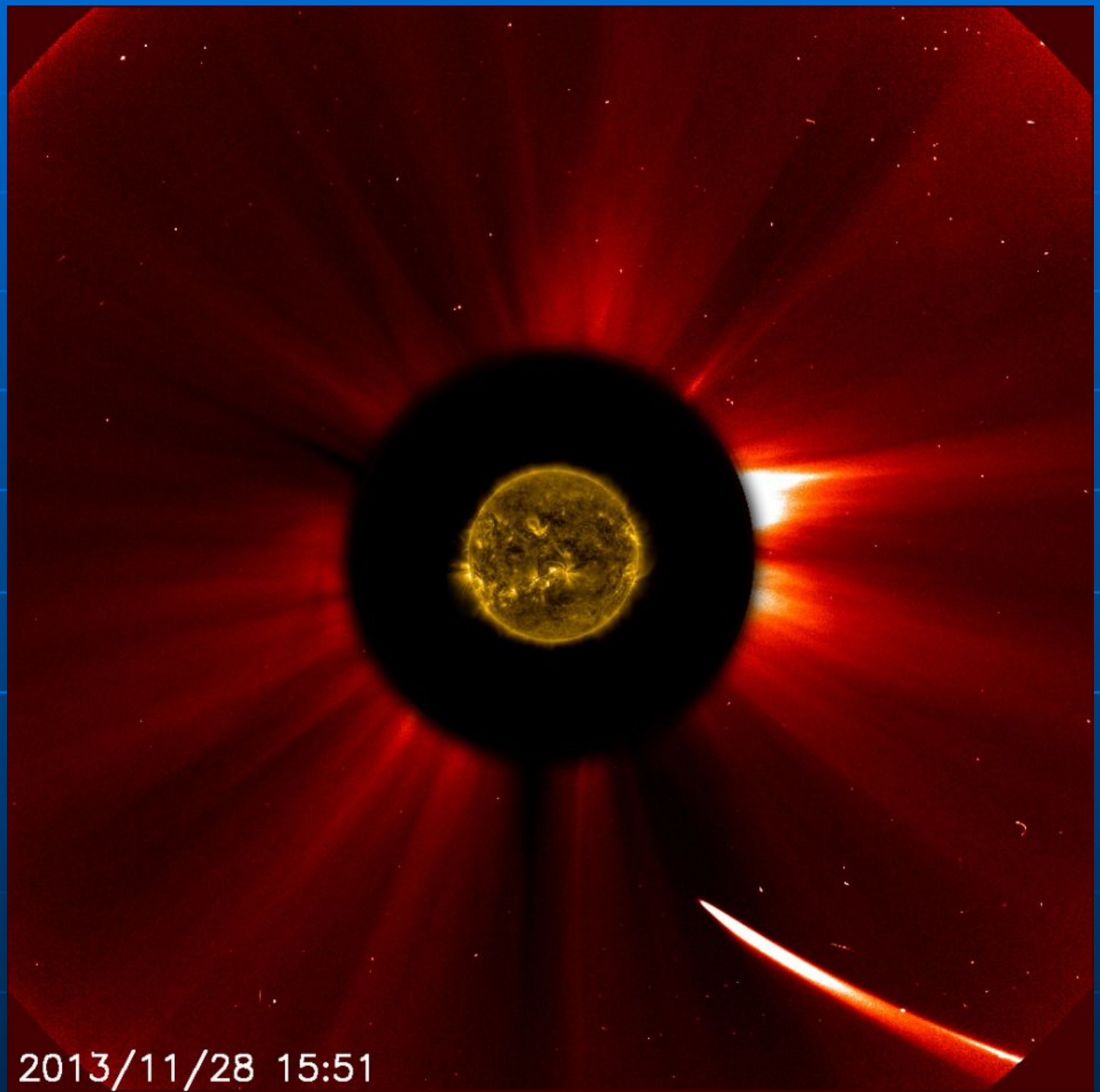
В большое число комет из семейства Крейтца регистрируется в непосредственной близости от Солнца (sungrazing comet) с помощью коронографа LASCO, установленного на солнечной космической обсерватории SOHO (http://lasco-www.nrl.navy.mil/) + обсерватория SDO (NASA).

В среднем, ***орбитальные обсерватории SOHO и SDO*** фиксируют изображения комет Крейтца один раз в три дня

Kamikaze Comet C/2011 N3
(в ночь с 5 на 6 июля, 2011)

Good-bye, Kamikaze Comet (October 3, 2011)





Comet ISON
(C/2012 S1)

Discovery date:
21 September
2012

Eccentricity
0.9999947
1.0002

Last perihelion
28 November
2013

Падение вещества на Солнце

Падение пыли: $\dot{M}_\odot/M_\odot$ **<< ($10^{-16} \div 10^{-17}$) в год**

<u>Общая масса астероидов главного пояса</u>, представленная суммой масс 301 крупнейших астероидов и астероидного кольца:

M_{belt} = (12.3 ±1.1) • $10^{-10} M_\odot$ **(≈ 3 массы Цереры).**

(Pitjeva, Pitjev 2013)

Падение астероидов: **< ($10^{-16} \div 10^{-17}$)** $M_\odot$ **в год**

Для оценки сверху *падающей массы с кометами* можно воспользоваться статистикой комет SOHO и принять, что все они имеют крупные ядра и сгорают в короне или падают на Солнце. Тогда получим завышенную оценку сверху

$$\dot{M}_{\odot,com}/M_\odot < +3.2 \cdot 10^{-14}.$$

Общий интервал для изменения $\dot{M}_\odot/M_\odot$

Для получения *нижней границы* возьмем максимальную оценку убыли за счет солнечного ветра и одновременно положим полное отсутствие падения вещества на Солнце.

Для верхней границы используем максимальную оценку падающего материала на Солнце и положим нулевую убыль массы с солнечным ветром.

Тогда получим

$$-9.8 \cdot 10^{-14} < \dot{M}_\odot/M_\odot < -3.6 \cdot 10^{-14} \quad \text{в год.}$$

Влияние на орбитальные элементы планет

Задача двух тел с переменной массой имеет давнюю историю: Гюльден (1884), Мещерский (1893), Стремгрен (1903), Пламмер (1906) и др.

Рассматривается вариант изотропного изменения массы центрального тела без появления реактивных сил. Сходная задача возникает при рассмотрении возможного изменения гравитационной постоянной в рамках гипотезы Дирака (1938).

Если обозначить $\mu(t)=G(M+m)$**, то векторное уравнение относительного движения запишется**

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{\mu(t)}{r^3}\mathbf{r}.$$

Поскольку поле остается центральным, сохраняется векторный интеграл площадей $\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}} = \mathbf{c}.$

Учитывая монотонность и малость $\dot{\mu}$, можно показать (Jeans, 1924), что выполняется инвариант

$$\mu(t)\cdot a(t) = const,$$ где a – полуось орбиты.

Отсюда $(G\dot{M}_\odot)/GM_\odot = -\dot{a}/a$.

Из интеграла площадей получается соотношение

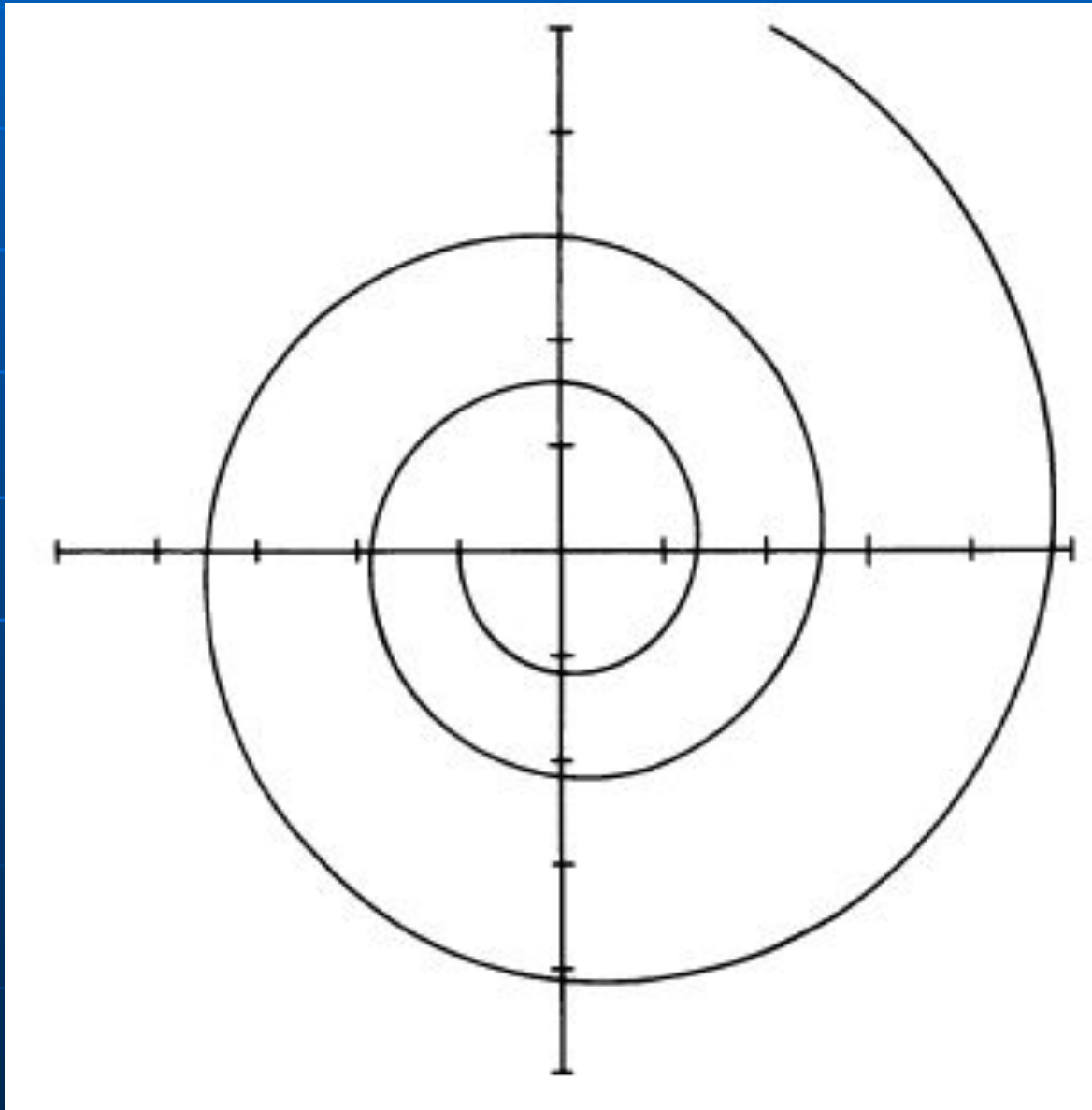
$$\mu(t)\cdot a(t)\cdot(1-e^2) = c^2, \qquad c=|c|,$$

откуда следует, что при рассматриваемых условиях эксцентриситет оскулирующей орбиты сохраняется

$$e = const$$ **(Jeans, 1925).**

При принятых условиях малости и монотонности изменения $\mu(t)$ аргумент перицентра не имеет векового тренда (Kevorkian, Cole, 1996) .

Орбита постепенно трансформируется, оставаясь подобной сама себе, и имеет спиралевидный характер.



Полученные значения изменения $M_\odot, G, a_i$

(MNRAS, 2013)

Наиболее достоверно определяется изменение гелиоцентрической гравитационной постоянной $GM_\odot$ (точность растет пропорционально квадрату интервала времени наблюдений) :

$(G\dot{M}_\odot)/GM_\odot$ **= (-6.3 ± 4.2)•10^{-14} в год (2σ)**

Одновременно были найдены вековые изменения больших полуосей планет. Положительные значения для планет с высокоточными наблюдениями подтверждают уменьшение – для полуосей Меркурия, Венеры, Земли, Марса, Юпитера и Сатурна.

Для полуосей Урана и Нептуна получились отрицательные значения, для Плутона – положительное, но эти результаты недостоверны из-за недостаточной точности наблюдательных данных для этих планет.

Из полученного результата для $G\dot{M}_\odot$ можно получить оценку для $\dot{G}$, используя соотношение

$$\dot{\mu}_\odot/\mu_\odot = \dot{G}/G + \dot{M}_\odot/M_\odot.$$

Можно записать, что с вероятностью 95 % (2σ)

$$-7.8 \cdot 10^{-14} < \dot{G}/G + \dot{M}_\odot/M_\odot < -2.3 \cdot 10^{-14}.$$

Отсюда, используя найденные ограничения для $\dot{M}_\odot/M_\odot$

$$-9.8 \cdot 10^{-14} < \dot{M}_\odot/M_\odot < -3.6 \cdot 10^{-14} \quad \text{в год},$$

находим, что с вероятностью 95 % значение $\dot{G}/G$ находится в интервале

$$-7.0 \cdot 10^{-14} < \dot{G}/G < +7.8 \cdot 10^{-14} \quad \text{per year.}$$

Оценка $\dot{G}/G$, полученная по данным лазерной локации Луны (Turyshev & Williams, 2007), дает следующие пределы для изменения G:

$\dot{G}/G$ = (6±7)·10^{-13} в год.

Найденное изменение $GM_\odot$, вероятно, отражает изменение именно $M_\odot$, а не G

$$(-6.3 \pm 4.3) \cdot 10^{-14} \quad \text{per year} \quad (2\sigma).$$

Это значение попадает в интервал ограничений для $\dot{M}_\odot/M_\odot$ и, по всей видимости, отражает баланс между теряемой массой через излучение и солнечный ветер и падающим материалом, содержащимся в кометах и падающих каменистых обломках и астероидах.

Французские коллеги получили (Fienga, et al., 2015) следующие оценки:

$$(G\dot{M}_\odot)/GM_\odot = (-4.3 \pm 5.0) \cdot 10^{-14} \text{ год}^{-1}, \quad (2\sigma)$$

$$\dot{G}/G = (4.9 \pm 10.5) \cdot 10^{-14} \text{ год}^{-1} \quad (2\sigma)$$

Статья вышла в Celestial Mechanics Dyn. Astr., 2015.

Темная материя в Солнечной системе

В современной космологии

слово *Dark* стало использоваться часто :

Dark Energy – темная энергия
Dark Matter – темная материя
Dark Forces – темные силы
Dark Dynamics – темная динамика
Dark Cosmology – темная космология
Dark Age – темная эпоха
Dark Worlds – темные миры
Dark radiation – темное излучение
Dark sector – темная часть Вселенной

Организованы

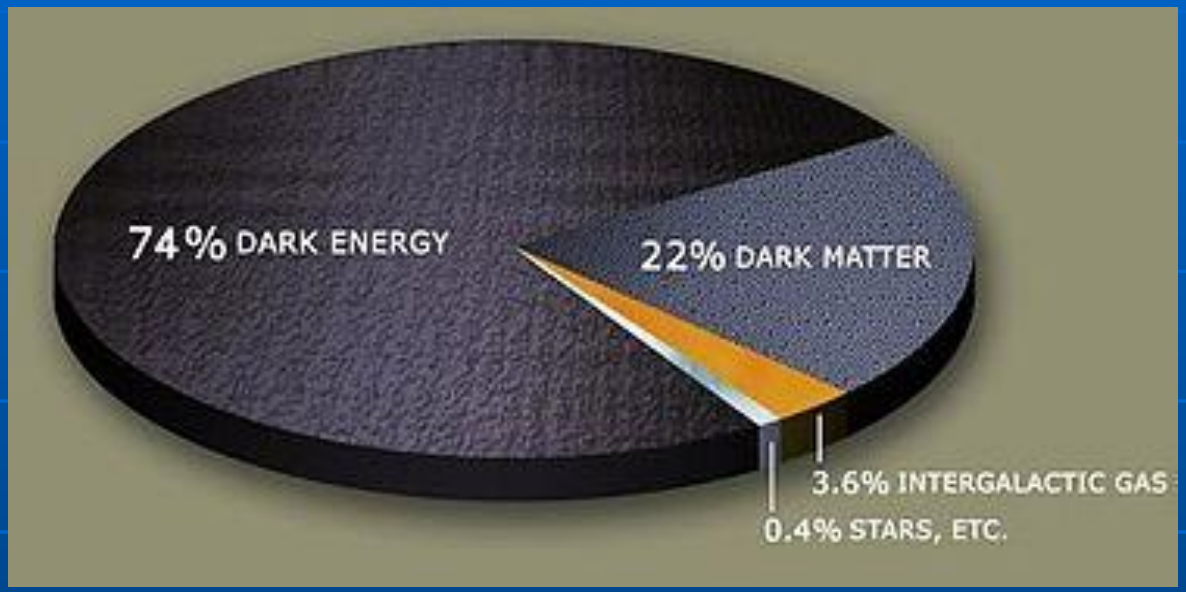
Dark Cosmology Centre, Niels Bohr Institute, University of Copenhagen

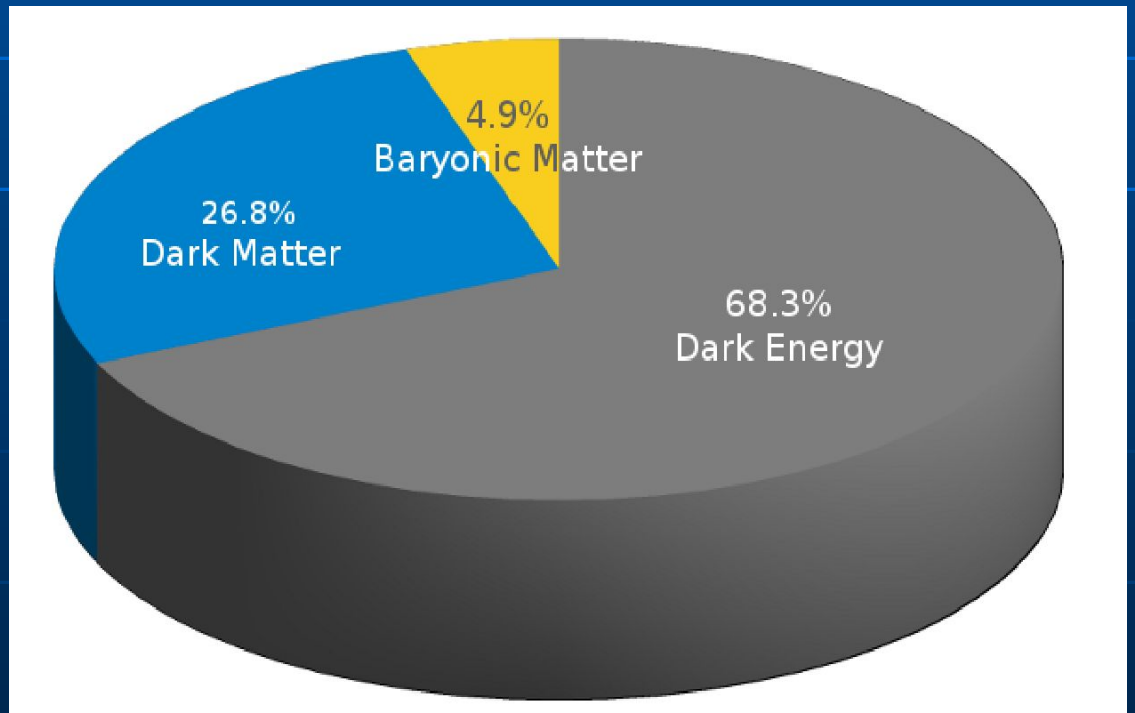
Journal "Physics of the Dark Universe"

International Workshop on **the Dark Side of the Universe**

и т.д.

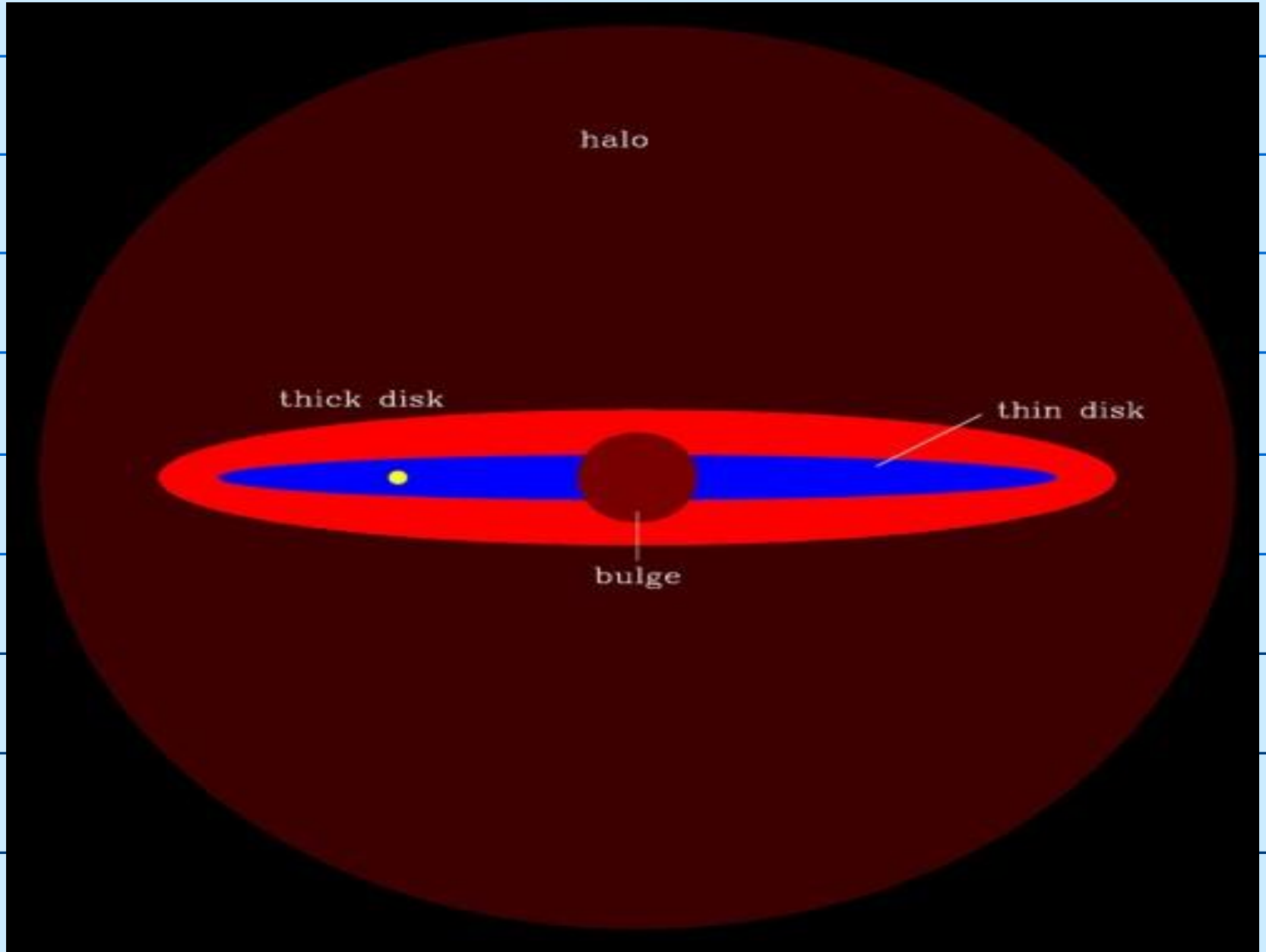
Темная материя во Вселенной





<== После результатов спутника **Planck** (2013)

В нашей Галактике



Плотность темной материи в гало нашей Галактики оценивается на уровне

$$\rho_{dm} \approx 5 \cdot 10^{-25} \text{ г/см}^3$$

Для поиска и исследования частиц темного вещества (WIMPs) или следов его возможного взаимодействия построены специальные экспериментальные установки (CRESST, CoGeNT, DAMA, XENON100, PAMELA, FERMI, HESS, CDMS, ANTARES, WMAP, SPT и др.), и строятся новые.

XENON100 - в итальянской подземной лаборатории Гран-Сассо
LUX - новый ксеноновый детектор (2013), смонтирован в тоннелях старой золотоносной шахты, Сэнфордская подземная лаборатория (США) .

Дополнительная центральная масса

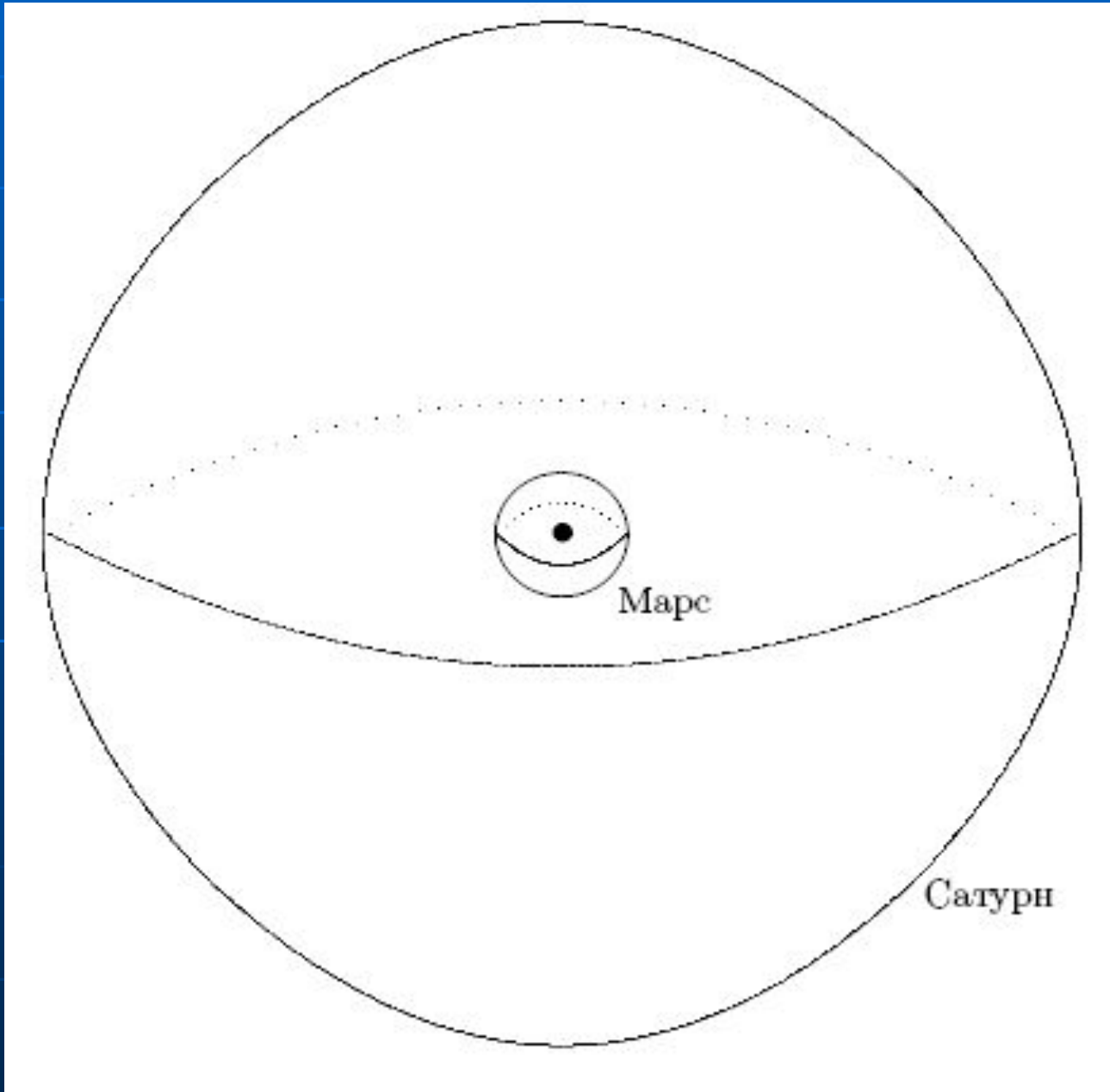
Есть дополнительное ускорение от распределенной материи:

$$(d^2r/dt^2)_{dm} = - GM(r)_{dm}/r^2 \ , \qquad (1)$$

где $M(r)_{dm}$ – масса распределенной материи, заключенной в сфере радиуса r вокруг Солнца.

При однородной плотности ρ распределенной гравитирующей среды, заполняющей солнечную систему, дополнительное ускорение будет пропорционально r:

$$(d^2r/dt^2)_{dm} = - kr \ . \qquad (2)$$


Марс
Сатурн

Дополнительное смещение перигелия

Если для единичной массы через *E, J* обозначить значения интегралов энергии и площадей, через *U(r)* – сферически симметричный потенциал, то уравнение движения по радиусу *r* запишется

$$dr/dt = \{ 2[E+U(r)] - (J/r)^2 \}^{1/2} , \qquad (3)$$

Уравнение движения по азимутальной координате *θ*

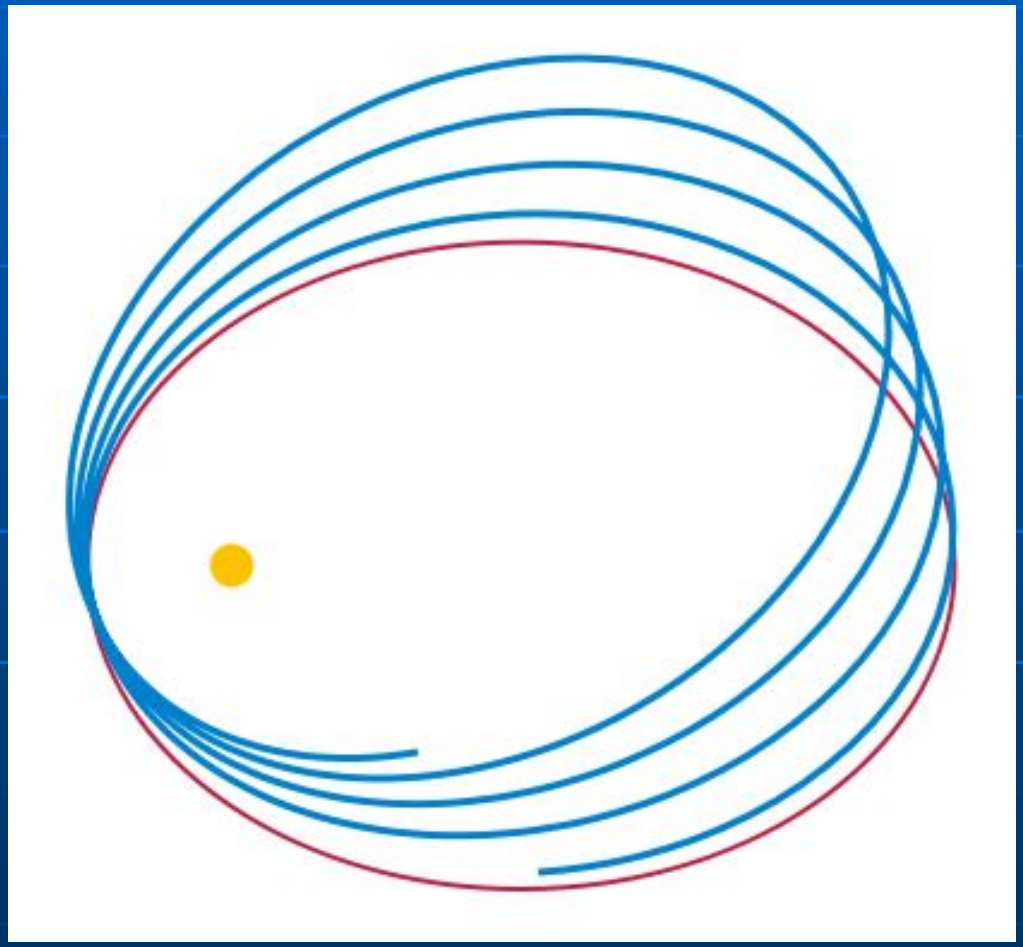
$$d\theta/dr = J/r^2 /\{ 2[E+U(r)] - (J/r)^2 \}^{1/2} . \qquad (4)$$

Наличие некоторой дополнительной распределенной материи приводит к более короткому радиальному периоду и к отрицательному дрейфу перицентра и апоцентра (в противоположную движению планеты сторону):

$$\Delta\theta_0 = -4\pi^2\rho_{dm}/M_{Sun} \bullet a^3(1-e^2)^{1/2} \qquad (5)$$

где $\Delta\theta_0$ - смещение перигелия за одно полное радиальное колебание.

Прецессия орбиты



Дополнительные смещения перигелиев из наблюдений планет и космических аппаратов

1 mas = 0".001

Планеты	π	$\lvert\sigma_\pi / \pi\rvert$
	mas/yr	
Меркурий	-0.020 ± 0.030	1.5
Венера	0.026 ± 0.016	0.62
Земля	0.0019 ± 0.0019	1.0
Марс	-0.00020 ± 0.00037	1.9
Юпитер	0.587 ± 0.283	0.48
Сатурн	-0.0032 ± 0.0047	1.5

Оценки плотности из данных для $\sigma_{\Delta\pi}$

Планеты	$\sigma_{\Delta\pi}$ [”/yr]	ρ [г/см^3]
Меркурий	0.000030	$< 9.3 \cdot 10^{-18}$
Венера	0.000016	$< 1.9 \cdot 10^{-18}$
Земля	0.0000019	$< 1.4 \cdot 10^{-19}$
Марс	0.00000037	$< 1.40 \cdot 10^{-20}$
Юпитер	0.000283	$< 1.7 \cdot 10^{-18}$
Сатурн	0.0000047	$< 1.1 \cdot 10^{-20}$

Оценки при однородном распределении плотности

Если исходить из предположения об однородном распределении ρ_{dm} в Солнечной системе, то из данных для Сатурна получается наиболее сильная ограничивающая оценка

$$\rho_{dm} < 1.1 \cdot 10^{-20} \quad г/см^3.$$

Тогда внутри сферического объема с размерами орбиты Сатурна масса

$$M_{dm} < 7.1 \cdot 10^{-11} M_{Sun}.$$

Эта величина меньше погрешности определения полной массы главного астероидного пояса.

Оценки при экспоненциальном распределении плотности

В качестве модели распределения с концентрацией к центру взято следующее выражение для плотности:

$$\rho_{dm} = \rho_0 \bullet e^{-cr}, \qquad (6)$$

где параметр ρ_0 – центральная плотность, c – коэффициент экспоненциального падения плотности к периферии.

Гравитационный потенциал, создаваемый сферически распределенной материей с плотностью (6), будет

$$U(r) = 4\pi G\, \rho_0 /r \bullet [2- e^{-cr} (cr+2)]/c^3 \qquad (7)$$

Параметры распределения (6) могут быть оценены по полученным результатам.

Масса внутри сферы радиуса r для распределения (6) равна

$$M_{dm} = 4\pi\, \rho_0 [2/c^3 - e^{-cr} (r^2/c + 2r/c^2 + 2/c^3)] \qquad (8)$$

Оценка массы темной материи до орбиты Сатурна найдена из оценивания масс на двух интервалах: от Сатурна до Марса и от Марса до Солнца. Для этого были использованы наиболее надежные данные в табл. для Сатурна ($\rho_{dm} < 1.1 \cdot 10^{-20}$ *г/см*^{3}), Марса ($\rho_{dm} < 1.4 \cdot 10^{-20}$ *г/см*^{3}) и Земли ($\rho_{dm} < 1.4 \cdot 10^{-19}$ *г/см*^{3}).

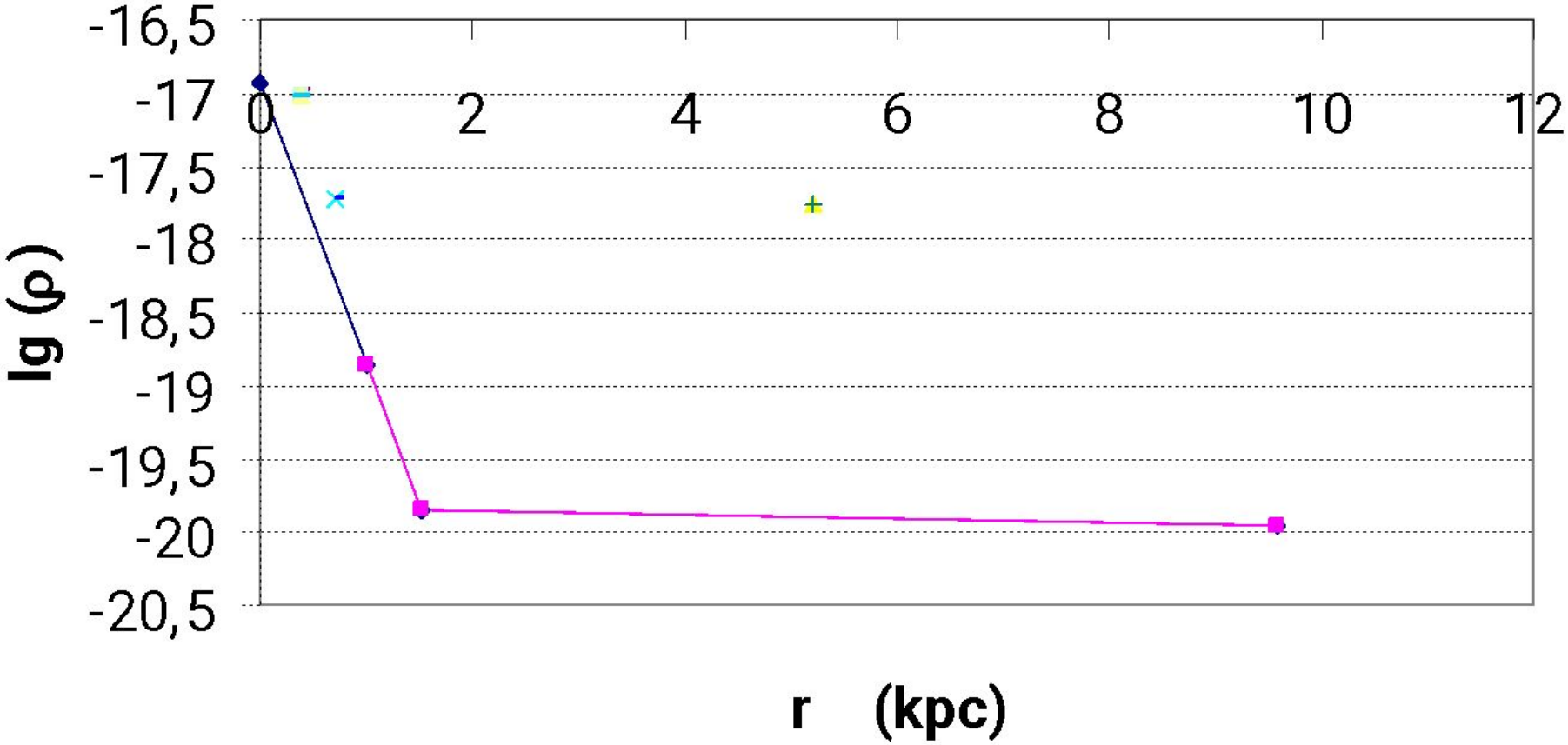
Между Марсом и Сатурном по данным для Марса и Сатурна получился очень пологий ход плотности с

$$\rho_0 = 1.47 \cdot 10^{-20} \text{ г/см}^3 \quad \text{и} \quad c = 0.0299 \text{ ае}^{-1}.$$

На интервале Марс – Солнце полученный ход плотности по данным для Земли и Марса дает крутой подъем к Солнцу с параметрами

$$\rho_0 = 1.17 \cdot 10^{-17} \text{ г/см}^3 \quad \text{и} \quad c = 4.42 \text{ ае}^{-1}.$$

Аппроксимация плотности при экспоненциальном распределении



Масса в объеме между орбитами Марса и Сатурна

$$M_{dm} < 7.33 \cdot 10^{-11} M_{Sun}.$$

Масса (14) между Солнцем и орбитой Марса оказалась

$$M_{dm} < 0.55 \cdot 10^{-11} M_{Sun}.$$

Включая оба интервала, верхняя граница для общей массы темной материи до орбиты Сатурна с учетом ее возможной концентрации к центру получилась

$$M_{dm} < 7.88 \cdot 10^{-11} M_{Sun},$$

то есть тоже порядка погрешности определения полной массы астероидного пояса $\pm 1.13 \cdot 10^{-10} M_{Sun}$ **(3σ)**

Результаты для темной материи

Уровень распределенной плотности темной материи ρ_{dm}, если она имеется, очень мал и существенно ниже современной погрешности определения таких параметров.

Найдено, что на расстоянии орбиты Сатурна плотность должна быть ниже, чем

$$\rho_{dm} < 1.1 \cdot 10^{-20}\ г/см^3 ,$$

а масса темной материи в сфере внутри орбиты Сатурна даже с учетом ее возможной концентрации к центру должна быть меньше чем

$$M_{dm} < 7.9 \cdot 10^{-11}\ M_{Sun} .$$

2013, Astronomy Letters, vol. 39, p. 141-149;
2013, MNRAS 432, 3431–3437

СПАСИБО

ЗА ВНИМАНИЕ